

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálového inženýrství



## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Únavové poškození ocelí pro železniční nápravy**

**Fatigue damage of steels for railway axles**

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Rostislav Pavlosek**

Studijní program:

B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor:

3911R028 Diagnostika materiálů

Téma:

Únavové poškození ocelí pro železniční nápravy  
Fatigue damage of steels for railway axles

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
  2. Teoretická část.
    - 2.1. Materiály pro železniční nápravy.
    - 2.2. Únavové poškození materiálů.
  3. Experimentální část.
- Studium příčin únavového poškození železničních náprav bez korozní ochrany.
4. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

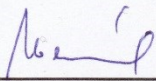
- [1] KLESNIL, M. et al. *Cyklická deformácia a únava kovov*. Bratislava: Veda, 1987.
- [2] CALLISTER, W. D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 7. vyd. New York: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 0-471-73696-1.
- [3] DIKMEN, F. et al. Railway Axle Analyses: Fatigue Damage and Life Analysis of Rail Vehicle Axle. *Journal of Mechanical Engineering*. 2012, vol. 58, s. 545-552. ISSN 0039-2480.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

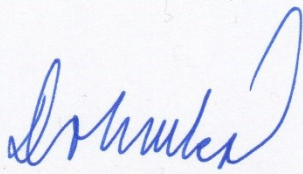
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Dr. Ing. Jaroslav Sojka**

Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 21.05.2015

  
prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# Zásady pro vypracování bakalářské práce

## I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

### Uspořádání bakalářské práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah BP                  |
| 2. Originál zadání BP                        | 7. Textová část BP           |
| 3. Zásady pro vypracování BP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na



ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra . . . . .*

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

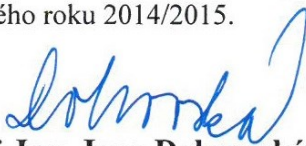
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2014/2015.

Ostrava 4. 11. 2014

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.**

V Ostravě 19.5.2015 .....

*Podпись Подпись*  
.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

**ABSTRAKT:**

Tato bakalářská práce řeší problém únavového poškození ocelí železničních náprav. Teoretická část zahrnuje seznámení s vlastnostmi a tepelným zpracováním ocelí používaných k výrobě železničních náprav. Dále jsou v práci popsána jednotlivá stadia únavového procesu a charakterizovány druhy životnosti materiálu. Experimentální část je věnována zjišťování iniciačních míst únavového poškození - korozních důlků. Na základě zjištěné přítomnosti korozních důlků je lze považovat za koncentrátory napětí a místa iniciace únavové trhliny. Jejich přítomnost tedy má značný negativní vliv na životnost železničních náprav.

**KLÍČOVÁ SLOVA:**

Železniční náprava, EA1N, EA4T, únavové poškození, korozní důlky

**ABSTRACT:**

This bachelor thesis deals with the problem of fatigue damage of steels for railway axles. The theoretical part includes acquaintance with the properties and heat treating steels used to manufacture railway axles. Furthermore, the thesis describes various stages of fatigue process and characterizes types of fatigue life of material. The experimental part is devoted to detection of initiation sites of fatigue damage – corrosion pits. On the basis of the presence of corrosion pits they can be considered as stress concentrators and fatigue crack initiation sites. Their presence has significant negative effect on the railway axles fatigue life.

**KEYWORDS:**

Railway axle, EA1N, EA4T, fatigue damage, corrosion pits

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. Dr. Ing. Jaroslavu Sojkovi za vstřícnost, ochotu, odborné vedení a cenné připomínky. Dále bych rád poděkovat své rodině a přítelkyni Klárce za podporu a trpělivost během mého studia.

## OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Oceli pro nápravy železničních dvojkolí .....</b>	<b>4</b>
2.1	<i>Oceli jakosti EA1N, EA1T a EA4T .....</i>	<i>4</i>
2.2	<i>Mechanické vlastnosti.....</i>	<i>4</i>
2.2.1	Zkouška tahem.....	4
2.2.2	Zkouška rázem v ohybu.....	5
2.2.3	Únavové vlastnosti .....	6
2.3	<i>Tepelné zpracování.....</i>	<i>6</i>
2.3.1	Normalizační žíhání.....	6
2.3.2	Kalení a popouštění .....	7
2.4	<i>Legující prvky v oceli EA4T .....</i>	<i>9</i>
2.4.1	Vliv manganu .....	9
2.4.2	Vliv křemíku.....	10
2.4.3	Vliv chromu.....	10
2.4.4	Vliv molybdenu .....	10
<b>3</b>	<b>Únavové poškození ocelí.....</b>	<b>11</b>
3.1	<i>Stádia únavového procesu .....</i>	<i>11</i>
3.1.1	Změny mechanických vlastností .....	12
3.1.2	Nukleace trhlin .....	13
3.1.3	Šíření trhliny.....	15
3.1.4	Závěrečný lom .....	17
3.2	<i>Nízkocyklová únava .....</i>	<i>18</i>
3.2.1	Iniciace a šíření trhliny u nízkocyklové únavy .....	19
3.2.2	Životnost hladkých a vrubovaných těles .....	19
3.2.3	Vliv provozních faktorů na nízkocyklovou únavu .....	20
3.3	<i>Vysokocyklová únava.....</i>	<i>20</i>
3.4	<i>Provozní únavová životnost.....</i>	<i>21</i>
3.5	<i>Korozní únava železničních náprav.....</i>	<i>21</i>
3.5.1	Vznik trhlin z korozních důlků.....	22



<b>4</b>	<b>Metody hodnocení únavového poškození náprav .....</b>	<b>23</b>
4.1	<i>Testování korozně-únavových vlastností oceli AIN .....</i>	23
4.2	<i>Vybavení pro optickou kontrolu náprav .....</i>	24
4.3	<i>Řádkovací elektronová mikroskopie .....</i>	24
<b>5</b>	<b>Experimentální část .....</b>	<b>25</b>
5.1	<i>Vlastnosti zkorodovaných náprav .....</i>	25
5.1.1	Výsledky únavových zkoušek .....	25
5.1.2	Tahová zkouška náprav .....	26
5.1.3	Metalografické pozorování povrchů .....	26
5.2	<i>Vzorky s iniciačními místy .....</i>	27
5.3	<i>Iniciační místa – korozní důlky .....</i>	28
5.3.1	Vzorek č. 28 .....	30
5.3.2	Vzorek č. 177 .....	31
5.3.3	Vzorek č. 227 .....	32
5.3.4	Vzorek č. 698 .....	33
5.3.5	Korozní důlky v odborné literatuře .....	34
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>36</b>
	<b>Použitá literatura: .....</b>	<b>37</b>

## 1 ÚVOD

Železniční náprava je mechanická součást železničního dvojkolí, které přenáší síly mezi vozidlem a kolejí. Jedná se tedy o součást pracující pod velkým zatížením, zejména rotace za ohybu, a proto je u této součásti důležitá její životnost. Problémem životnosti železničních náprav se zabýval už v 19. století August Wöhler. V současnosti jsou železniční nápravy používány na evropských železničních sítích vyráběny zejména ze dvou jakostí oceli – EA1N a EA4T. Požadavky kladené na vlastnosti železničních náprav jsou detailně popsány v evropské normě EN 13261 [1, 2].

V této bakalářské práci budou popsány nejběžněji používané jakosti ocelí používaných pro výrobu železničních náprav, jejich mechanické vlastnosti a tepelné zpracování používané při jejich výrobě. V další části práce bude vylicena problematika únavového poškození železničních náprav, jednotlivá stadia únavového procesu a druhy únavové životnosti. Experimentální část práce bude věnována identifikaci iniciátorů předčasného únavového poškození železničních náprav, kterými jsou korozní důlky, a jejich vlivu na životnost železničních náprav.

## 2 OCELI PRO NÁPRAVY ŽELEZNIČNÍCH DVOJKOLÍ

Nápravy železničního dvojkolí jsou vyráběny z ocelí, jejichž složení a vlastnosti jsou uvedeny v normě ČSN EN 13261. V současnosti jsou nejběžněji užívané jakosti na evropských sítích EA1N, EA1T a EA4T. Pro dvojkolí vysokorychlostních vlaků je využívána vysokopevná legovaná ocel jakosti 30NiCrMoV12. Dříve byly také užívány jakosti nelegovaných ocelí A3 a legovaných ocelí A2 a A5 [1, 2, 3].

### 2.1 Oceli jakosti EA1N, EA1T a EA4T

Ocel kategorie A1 je nelegovaná ušlechtilá ocel k zušlechťování s obsahem uhlíku 0,4 %. Ocel A1 může být v normalizovaném stavu, označení písmenem N za názvem oceli, nebo ve stavu kaleném a popouštěném, označení písmenem T. Matrice oceli v normalizovaném stavu musí být tvořena feritickou a perlitickou mikrostrukturou s velikostí feritického zrna max. 20-40  $\mu\text{m}$ . Maximální obsahy jednotlivých prvků obsažených v oceli A1 jsou uvedeny v tabulce 1, údaje jsou uvedeny v hmotnostních procentech [1, 3, 4, 5].

Ocel kategorie A4 může být označována jako 25CrMo4. 25CrMo4 je nízkolegovaná ušlechtilá chrom-molybdenová ocel k zušlechťování. Obvykle bývá kalena a následně popouštěna. Matrice oceli musí mít strukturu bainitu, respektive popouštěného martenzitu. Její chemické složení, v hmotnostních procentech, je uvedeno v tabulce 1 [1, 6].

Tabulka 1: Chemické složení (hm. %) [1]

Jakost	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
EA1T	0,40	0,50	1,20	0,020	0,020	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06
EA4T	0,22- 0,29	0,15- 0,40	0,50- 0,80	0,020	0,015	0,90- 1,20	0,30	0,15- 0,30	0,30	0,06

Pro C, Si a Mn se hodnoty uvedené v tabulce 1 vztahují k rozboru tavby. Pro prvky P, S, Cr, Cu, Mo, Ni a V se hodnoty vztahují k rozboru výrobku [3].

### 2.2 Mechanické vlastnosti

#### 2.2.1 Zkouška tahem

Oceli používané k výrobě náprav musí dosahovat minimálních pevnostních vlastností. Ty jsou zjišťovány zkouškou tahem. Hodnoty, které musí být dosaženy ve středu poloměru

plných náprav nebo ve střední vzdálenosti mezi vnitřním a vnějším povrchem náprav dutých, jsou uvedeny v tabulce 2 [1].

Tabulka 2: Hodnoty získané zkouškou tahem [1]

<b>Jakost</b>	<b>R<sub>eH</sub> (MPa)<sup>a</sup></b>	<b>R<sub>m</sub> (MPa)</b>	<b>A<sub>5</sub> (%)</b>
<b>EA1N</b>	≥320	550-560	≥22
<b>EA1T</b>	≥350	550-700	≥24
<b>EA4T</b>	≥420	650-800	≥18
<sup>a</sup> Pokud není výrazná mez kluzu, musí se stanovit mez kluzu R <sub>p0,2</sub> .			

Hodnoty naměřené na zkušebním tělese odebraném co nejblíže vnějšího povrchu nápravy musí být větší nebo rovny 0,95 násobku hodnot uvedených v tabulce 2. Při odebrání zkušebního tělesa z oblasti středu plné nápravy nebo blízko vnitřního povrchu duté nápravy musí být naměřené hodnoty větší nebo rovny 0,8 násobku hodnot uvedených v tabulce 2 [1].

### 2.2.2 Zkouška rázem v ohybu

Vlastnosti získané touto zkouškou musí být stanoveny v podélném a příčném směru při teplotě 20°C. Hodnoty při zkoušce rázem v ohybu se získávají ze stejných oblastí náprav, které byly uvedeny při tahové zkoušce. Odpovídají i násobky hodnot, které je třeba dosáhnout v okrajových částech duté nápravy, respektive okrajové a středové části plné nápravy. Hodnoty, které musí být dosaženy pro střed poloměru plné nápravy nebo střední vzdálenost mezi vnějším a vnitřním povrchem duté nápravy, jsou uvedeny v tabulce 3 [1].

Tabulka 3: Hodnoty získané zkouškou rázem v ohybu [1]

<b>Jakost oceli</b>	<b>KU podélně (J)</b>	<b>KU příčně (J)</b>
<b>EA1N</b>	≥30	≥20
<b>EA1T</b>	≥40	≥25
<b>EA4T</b>	≥40	≥25

KU, v tabulce 3, je absorbovaná energie u vzorků s U-vrubem. Hodnoty uvedené v tabulce 3 jsou pro každou hladinu stanoveny jako průměrná hodnota 3 zkušebních těles. Žádná z hodnot nesmí být menší než 70% hodnoty uvedené v tabulce [1].

### 2.2.3 Únavové vlastnosti

Na únavových charakteristikách závisí uspokojivé chování náprav během provozu. Z únavových hodnot uvedených v tabulce 4 se vypočítávají maximální přípustná napětí. Chování nápravy při napětích způsobených provozem a hodnocení meze únavy se stanovuje ve dvou oblastech:

- a) na redukováných zkušebních tělesech;
- b) na zkušebních tělesech o plné velikosti.

Mez únavy, která je stanovena pro redukováná zkušební tělesa, je využívána k ověřování, zda vliv vrubu v materiálu použitém při výrobě nápravy je v souladu se součinem bezpečnosti „S“. Stanovuje se ze:

- zkušebních těles s hladkým povrchem (mez únavy  $R_{fL}$ );
- zkušebních těles s vruby (mez únavy  $R_{fE}$ ).

Na zkušebních tělesech plné velikosti se stanovují meze únavy, které slouží k ověření únavových charakteristik nápravy s charakteristikami používanými pro výpočet maximálních dovolených napětí. Definují se dvě meze únavy:

- na povrchu tělesa (mez únavy  $F_1$ );
- na povrchu otvoru duté nápravy (mez únavy  $F_2$ ) [1].

Tabulka 4: Mezní hodnoty únavy [1]

Jakost	$F_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_2$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_{fL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_{fE}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$q=R_{fL}/R_{fE}$
EA1N	$\geq 200$	$\geq 80$	$\geq 250$	$\geq 170$	$\leq 1,47$
EA1T	$\geq 200$	$\geq 80$	$\geq 250$	$\geq 170$	$\leq 1,47$
EA4T	$\geq 240$	$\geq 96$	$\geq 350$	$\geq 215$	$\leq 1,63$

## 2.3 Tepelné zpracování

Tepelná zpracování použitá u ocelí EA1N, EA1T a EA4T jsou obsažena v jejich označení konečným písmenem, jak již bylo uvedeno výše. Písmeno N označuje stav oceli normalizačně žíhaný a písmeno T označuje stav oceli kalený a popouštěný [3].

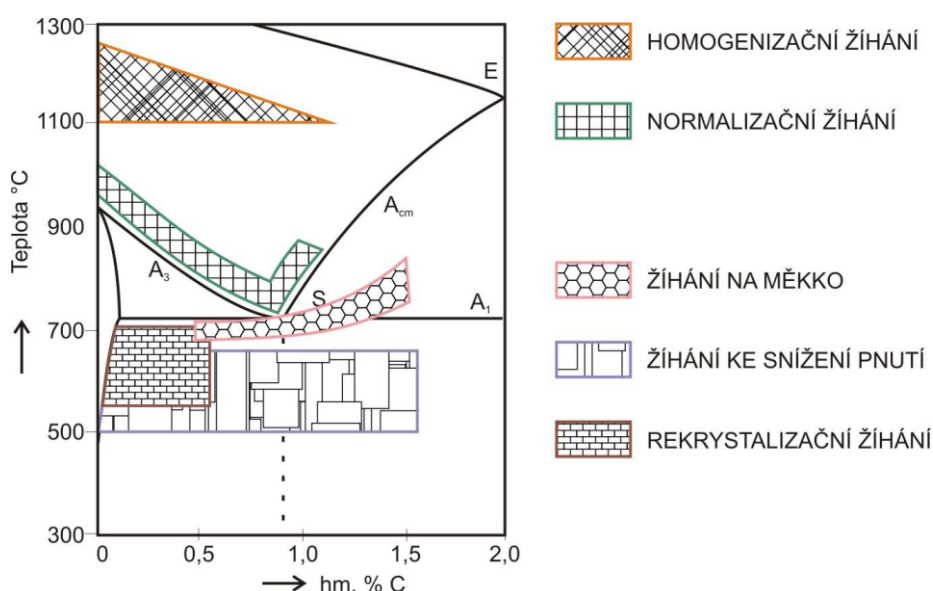
### 2.3.1 Normalizační žíhání

Normalizační žíhání se řadí mezi žíhání s překrystalizací, tzn., že dochází k úplné nebo téměř úplné přeměně původní feriticko-cementitické struktury na austenit. Ocel A1 odpovídá



svým obsahem uhlíku (0,4%) podeutoektoidní oceli, a proto se bude žíhat nad teplotu  $A_{c3}$ . Tímto se docílí větší rovnoměrnosti struktury a odstraní se chemická nehomogenita oceli [1, 7].

Normalizační žíhání se provádí za účelem zrovnoměnění struktury po předchozím zpracování oceli a vytvoření jemnozrnné struktury, která vykazuje vyšší mez kluzu a mez pevnosti při současně dobrých plastických vlastnostech. U podeutektoidních ocelí se ohřev provádí na teplotu 30-50°C nad teplotu  $A_{c3}$ . Výdrž na teplotě bývá obvykle 1-4 hodiny. Během následného ochlazení na klidném vzduchu vzniká v oceli požadovaná feriticko-perlitická struktura. U ocelí s vyšším obsahem uhlíku (nad 0,3%) se někdy ochlazuje z austenitizační teploty v peci z důvodu zabránění vzniku struktury s nadměrnou tvrdostí [7]. Oceli EA1N by tedy měl odpovídat režim, kdy se ocel ohřeje na teplotu 860-900°C. Doba výdrže na této teplotě je závislá na průměru nápravy a měla by odpovídat cca 1 hodině výdrže na 25 mm tloušťky [5, 7].



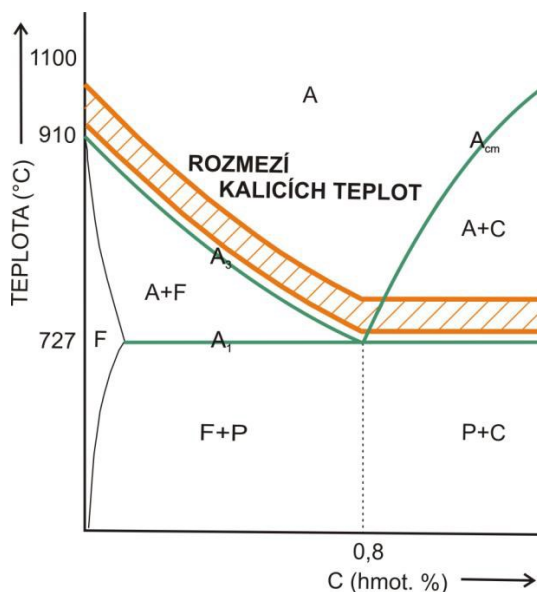
Obrázek 1: Rozmezí žíhacích teplot v diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C [7]

### 2.3.2 Kalení a popouštění

Kalení oceli je proces, při kterém se ocel ohřeje na kalicí teplotu, následuje výdrž na teplotě z důvodu homogenizace austenitu a poté ochlazení oceli nadkritickou rychlostí na teplotu vzniku nerovnovážných struktur oceli, tj. martenzitu nebo bainitu. Kalením se zvyšuje především tvrdost, ale lze jím změnit i fyzikálně-chemické vlastnosti, elektrické a magnetické vlastnosti, odolnost proti korozi, atd. Důležitá je volba vhodné kalicí teploty, vhodné délky výdrže na kalicí teplotě a příslušné rychlosti ochlazování [7, 8].

Při ohřátí podeutektoidní oceli pod teplotu  $A_{c3}$  se ferit v austenitu úplně nerozpustí a po ochlazení se v mikrostruktuře oceli objeví kromě martenzitu i ferit. Přítomnost feritu se projeví nižší tvrdostí a větším vnitřním pnutím. Naopak při značném přehřátí oceli nad teplotu  $A_{c3}$  nebo příliš dlouhé výdrži na kalicí teplotě dojde k růstu austenitického zrna. Velké austenitické zrno vede ke vzniku hrubých martenzitických jehlic, které společně s vyšším množstvím zbytkového austenitu způsobují zvýšení vnitřních pnutí, zhoršení mechanických vlastností a náchylnost k tvoření trhlin [7, 8].

Nejlepší vlastnosti oceli získáme, ohřejeme-li ocel na teplotu 30-50°C nad  $A_{c3}$  u podeutektoidních ocelí a nad teplotu  $A_{c1}$  u většiny nadeutektoidních ocelí. Pro ocel EA1T je kalicí teplota 840-880°C. Ocel EA4T je zahřívána na teplotu 830-860°C a následně kalena do vody, nebo může být zahřívána na teplotu 850-880°C při následném kalení do oleje [5, 6, 7, 9].



Obrázek 2: Pásmo kalicích teplot v diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C [7]

Délka výdrže na kalicí teplotě má vliv na dosažení požadované struktury a požadovaných vlastností oceli. Je závislá na rozměrech a tvaru výrobku, na jeho chemickém složení a počáteční struktuře. Čím více má těleso složitější tvar, tím menší by měla být výdrž na kalicí teplotě [8].

Nejdůležitějším aspektem při kalení je rychlost ochlazování. Díky správné rychlosti ochlazování docílíme požadovaných struktur a vlastností oceli. V oblasti perlitického nosu by rychlost ochlazování měla být dostatečně rychlá, aby nevznikal ferit nebo perlit. Naopak v oblasti teploty  $M_s$  by rychlost ochlazování měla být dostatečně pomalá, aby nevznikala vysoká vnitřní pnutí. Rychlost ochlazování závisí na volbě kalicího prostředí. Jako kalicí

prostředí lze použít solné lázně, roztavené kovy, kalici kovové desky, vzduch, vodu, oleje i roztoky polymerů. Ocel EA1T může být kalena do vody, při spodní hranici teploty ohřevu, nebo do oleje, při horní hranici teploty ohřevu. Ocel EA4T bývá kalena do vody nebo do oleje, v závislosti na zvoleném rozmezí teploty ohřevu. Jako kalici prostředí lze použít i emulze ze syntetických polymerů [5, 6, 7, 8].

Popouštění je tepelné zpracování, pomocí kterého se převádí ocel z nerovnovážného stavu do stavu rovnovážného. Zakalená ocel se ohřívá na teploty nižší než je bod  $A_{c1}$ . Pro ocel EA4T je teplota  $A_{c1}$  rovna  $745^{\circ}\text{C}$ . Ocel jakosti EA4T se při popouštění ohřívá na teplotu  $530\text{--}690^{\circ}\text{C}$  s následným ochlazením na vzduchu. Po ohřevu následuje výdrž na teplotě minimálně 1 hodinu a poté se ocel pomalu nebo rychle ochladí. Při popouštění nedochází k fázové překrystalizaci, avšak původní martenzit se přemění na ferit a globulární karbidy. Popouštěný martenzit je částečně rozpadlý tuhý roztok a obsah uhlíku v něm závisí na teplotě popouštění. Hlavním účelem popouštění je odstranění vnitřních pnutí, zlepšení houževnatosti a změkčení oceli [7, 8, 9].

Rozlišujeme mezi popouštěním nízkoteplotním a vysokoteplotním. Nízkoteplotní popouštění vede ke snížení vnitřních pnutí a zmenšení obsahu zbytkového austenitu. Realizuje se při teplotách  $100\text{--}300^{\circ}\text{C}$ . Optimální kombinace pevnostních vlastností, houževnatosti a plasticity se dosahuje pomocí vysokoteplotního popouštění, které se provádí při teplotách  $400\text{--}650^{\circ}\text{C}$ . Po vysokoteplotním popouštění se mění poměr meze kluzu a meze pevnosti. Proces, kdy se ocel kalí na martenzit a následně se vysokoteplotně popouští, je nazýván zušlechťováním [7].

## **2.4 Legující prvky v oceli EA4T**

Ocel EA4T je nízkolegovaná chrom-molybdenová ocel. Je legována chromem a molybdenem, avšak dalšími důležitými přísadovými prvky jsou mangan a křemík. Legování vyvolává v oceli změnu struktury a vlastností, např. může příznivě zvyšovat prokalitelnost ocelí, zjemňovat zrna, zvyšovat pevnost tuhého roztoku, atd. [6, 10].

### **2.4.1 Vliv manganu**

Mangan má větší afinitu k uhlíku než železo, a proto se rozpouští v cementitu, samostatné karbidy typu  $\text{Mn}_3\text{C}$  se však většinou netvoří. Rozšiřuje také teplotní oblast stability austenitu. Mangan také silně zvyšuje prokalitelnost ocelí. Jelikož je dobře rozpustný jak ve feritu, tak i v austenitu, nezvyšuje pevnost tuhého roztoku [10].

#### **2.4.2 Vliv křemíku**

Křemík v oceli je prvek, který uzavírá pole austenitu, tzn., že u nízkouhlíkových ocelí je při malém množství křemíku částečně nebo úplně potlačena transformace na austenit. S železem tvoří intermetalické fáze, tzv. silicidy, jelikož se od něj liší strukturou atomu. Může se rozpouštět ve feritu, při čemž se mění vlastnosti feritu, např. se zvyšuje tvrdost, zhoršuje se tvárnost a zvyšuje se elektrický odpor. Při tepelném zpracování zvyšuje křemík rovnovážné teploty  $A_1$  a  $A_3$ . Po zakalení je v křemíkové oceli přítomno více zbytkového austenitu a při popouštění zpomaluje rozpad martenzitu [10].

#### **2.4.3 Vliv chromu**

Chrom také patří k legujícím prvkům uzavírajícím pole austenitu. Při nízkých koncentracích snižuje teplotu  $A_{c3}$ . Chrom má stejnou krystalovou mřížku jako ferit, a proto je v něm dobře rozpustný. V důsledku dobré vazby na uhlík s ním vytváří karbidické fáze. Silně zvyšuje prokalitelnost ocelí a zpomaluje pokles tvrdosti při popouštění. Chrom také mění fyzikálně-chemické vlastnosti tuhých roztoků, např. zvyšuje odolnost proti korozi a proti opalu [10].

#### **2.4.4 Vliv molybdenu**

Legování molybdenem má na vlastnosti oceli podobný vliv jako legování wolframem. Tvoří stabilní karbidy, jež mají odlišnou mřížku od cementitu, ve kterém je velmi špatně rozpustný. Díky velké afinitě k uhlíku zvyšuje prokalitelnost a při popouštění vznikají za určitých teplot karbidy molybdenu, které zvyšují tvrdost oceli, tzn. sekundární tvrdost. Tvrdost oceli může zvyšovat i precipitačním vytvrzováním. Společně se svými karbidy zvyšuje tvrdost ocelí za vysokých teplot a odolnost proti tečení. Má příznivý vliv na odstranění popouštěcí křehkosti, a proto je přidáván do ocelí určených ke kalení a vysokému popouštění [10].

### 3 ÚNAVOVÉ POŠKOZENÍ OCELÍ

Únavové poškození je degradační proces, který vzniká jako následek působení různě velkých sil působících na součást během jejího provozu. Po dostatečně dlouhé době působení těchto sil začnou vznikat v povrchových vrstvách mikrotrhliny, jejichž počet roste s časem. Stádium velkého počtu mikrotrhlin poté přechází do stádia šíření jedné velké trhliny, která roste až do závěrečného lomu [11].

Potlačení vzniku únavových trhlin a zvýšení životnosti součásti závisí na charakteru povrchových úprav, tvaru součásti, způsobu namáhání, odolnosti materiálu proti vzniku únavového poškození. Vzhledem k velikosti železničních náprav nemůže být posouzení únavové odolnosti založeno pouze na výsledcích zkoušek prováděných na malých tělesech, a proto se zkouší i hotové prototypy. Tyto prototypy jsou zkoušeny na zařízeních simulujících skutečné provozní zatížení. Při posuzování únavové životnosti je třeba brát v úvahu vystavení náprav náhodným vlivům jako např. vystavení větru, dešti apod. [11].

V druhé polovině 20. století byla prosazena myšlenka o poznání zákonitosti procesů způsobujících únavu materiálu a následný mezní stav. Ta vedla k poznání etap únavového poškození, jako jsou změny mechanických vlastností v celém objemu tělesa, nukleace únavových trhlin, spojování nukleovaných trhlin a jejich šíření v mikroskopických rozměrech, stádium vzniku makroskopické trhliny šířící se tělesem a závěrečný lom [12].

#### 3.1 Stádia únavového procesu

Základním a rozhodujícím faktorem procesu poškozování při proměnlivém zatěžování je nevratná cyklická plastická deformace. Ta se nejprve projevuje změnami mechanických vlastností v zatěžovaném objemu tělesa, poté následuje vznik únavových trhlin, dále šíření trhlin v plastické zóně vytvořené před jejich čelem, které je obvykle zakončené lomem. Díky poznání zákonitostí únavového děje můžeme zvýšit odpor proti únavovému lomu zásahy do struktury. Celý únavový proces můžeme rozdělit do 4 navazujících stádií:

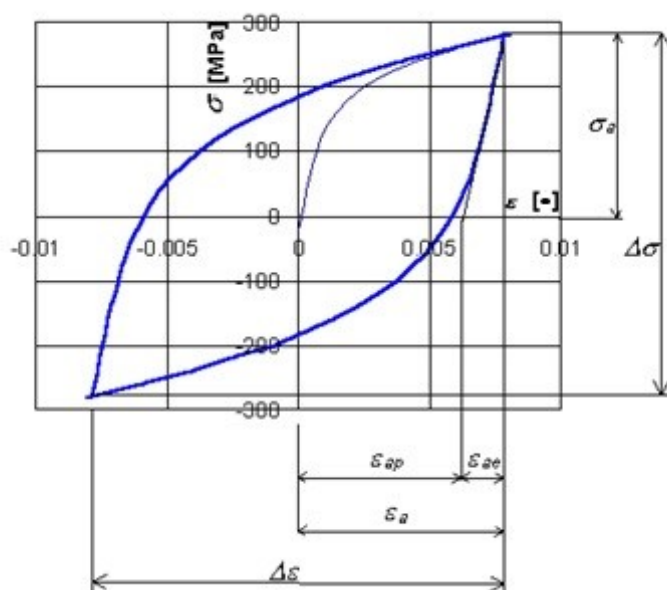
- únavové zpevnění nebo změkčení
- iniciace únavových trhlin
- šíření únavové trhliny
- závěrečný lom

Mezi jednotlivými stádii neexistují vymezené hranice a procesy jednotlivých stádií probíhají v určitých fázích procesu současně [12, 13].



### 3.1.1 Změny mechanických vlastností

Cyklické zatěžování kovů vede ke změně jejich struktury, a tudíž ke změně jejich fyzikálních vlastností v celém objemu zatěžované součásti. V zatěžovaném objemu se mění hustota a konfigurace mřížkových poruch. Tyto změny jsou nejvýraznější na začátku cyklického zatěžování a s rostoucím počtem cyklů jejich intenzita klesá, až dokud se hodnota měřené veličiny neustálí, nebo je její změna nevýrazná. Důležité jsou změny mechanických vlastností charakterizující odpor kovu proti plastické deformaci způsobené vnějšími silami. Změny mechanických vlastností slouží k popisu únavového děje a nejlépe je popisuje hysterezní smyčka, která je znázorněna na obrázku 3 [12, 13].



Obrázek 3: Hysterezní smyčka [14]

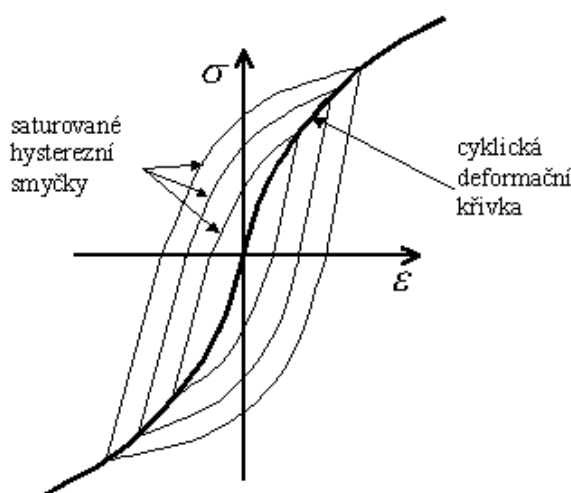
Na tomto obrázku je  $\sigma_a$  amplituda napětí,  $\epsilon_a$  je amplituda celkové deformace,  $\epsilon_{ap}$  je amplituda plastické deformace a  $\epsilon_{ae}$  je amplituda elastické deformace [12].

Při různých amplitudách zatížení dostáváme různé hysterezní smyčky, které se mění až do dosáhnutí saturace hodnot sledované veličiny. V případě, že vrcholovými body hysterezních smyček proložíme křivku, dostaneme tzv. cyklickou deformační křivku (obr. 4), která charakterizuje závislost mezi amplitudou napětí a amplitudou plastické deformace. Cyklická deformační křivka popisuje cyklické plastické vlastnosti v průběhu provozní životnosti materiálu. Lze ji popsat mocninnou funkcí:

$$\sigma_a = k(\epsilon_{ap})^n,$$

kde  $k$  je součinitel cyklické pevnosti a  $n$  součinitel cyklického zpevnění [12].

Při porovnání cyklické deformační křivky s tahovým diagramem můžeme učit, zda se materiál cyklicky změkčuje nebo zpevňuje. Cyklické zpevnění je charakteristické pro žíhané materiály, jejichž poměr meze pevnosti k mezi kluzu je:  $R_m/R_e \geq 1,4$ . Naopak cyklické změkčení vykazují materiály, které již byly nějak zpevněné, např. materiály precipitačně zpevněné, deformačně zpevněné nebo zpevněné příměsovými atomy, a poměrem  $R_m/R_e < 1,2$  [12, 14].



Obrázek 4: Cyklická deformační křivka [14]

Plastickou deformaci kovů způsobuje vnější zatížení v závislosti na teplotě a rychlosti zatěžování. Vnější napětí je v každém bodě tělesa v rovnováze s vnitřními napětími, které mohou mít různé délky dosahu. Zdrojem krátkých napětíových polí jsou např. Peierls-Nabarrovo napětí, shluky bodových poruch a protínání dislokací, naopak mezi zdroje dlouhých napětíových polí patří nakupení dislokací na překážkách. Pro výpočet celkového napětí můžeme použít princip superpozice:

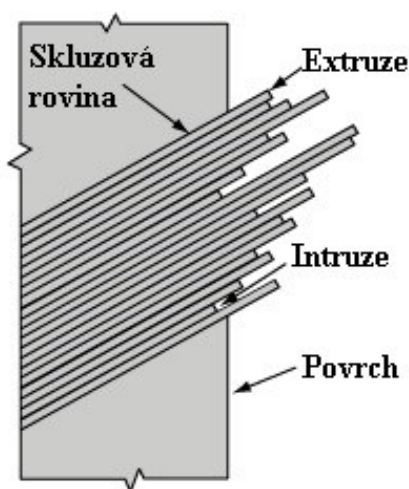
$$\sigma = \sigma_k + \sigma_d,$$

kde  $\sigma_k$  jsou napětíová pole krátkého dosahu a  $\sigma_d$  jsou napětíová pole dlouhého dosahu [12].

### 3.1.2 Nukleace trhlin

Únavové trhliny vznikají skoro výhradně na povrchu tělesa, zejména v místech nerovností vniklých mechanickým opracováním, korozi nebo také nedokonalostí svarových spojů. Často mohou únavové trhliny vznikat na rozměrnějších inkluzích v povrchových vrstvách materiálu. Výjimkou mohou být tělesa výrazně strukturně nehomogenní nebo s vnitřními defekty dostatečných rozměrů, kde první trhliny mohou vznikat na jiných místech.

Vznik trhlin na povrchu je způsoben cyklickou plastickou deformací, která způsobuje změnu uspořádání dislokačních struktur uvnitř zatěžovaného tělesa a tím vznik nového povrchového reliéfu. Důsledkem cyklického zatěžování vznikají skluzová pásma, jejichž četnost a intenzita roste s rostoucím počtem cyklů. Tato pásma způsobují povrchovou extruzi, respektive intruzi, které mají vrubové účinky (obr. 5). Vrubové účinky intruzí jsou výraznější a způsobují velké lokální napětí. Tato velká lokální napětí musí být vyšší, než mezní lokální napětí, aby mohl vzniknout zárodek trhliny. Mikrotrhliny proto vznikají na rozhraní volného povrchu a únavových skluzových pásem [11, 12, 13, 15].



Obrázek 5: Znázornění extruze a intruze [16]

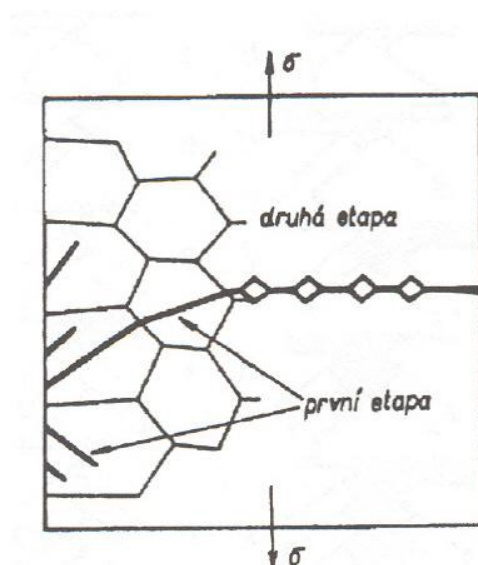
Vzhledem k přednostní iniciaci únavových trhlin na povrchu materiálu je důležité zpracování a opracování povrchové vrstvy pro ovlivnění životnosti materiálu. Stav povrchu má vliv jak na únavovou životnost, tak i na mez únavy. Jedná se o mechanické, tepelné a chemicko-tepelné zpracování povrchu, např. broušení, nitridace [12, 15].

Během cyklického zatěžování nevzniká na povrchu pouze několik mikrotrhlin, ale jejich počet je veliký, avšak pouze část z nich se může dále šířit. Za minimální napětí, při kterém se mohou mikrotrhliny šířit, můžeme považovat mez únavy. Šíření mikrotrhlin je těžce popsatelný proces, stejně jako rozeznání okamžiku, kdy skončila nukleace a kdy začalo šíření trhlin. Předpokládá se, že rozhraní mezi nukleací a šířením mikrotrhlin určují mikrotrhliny kritické velikosti  $l_c$  [12].

Kritická velikost mikrotrhlin  $l_c$  charakterizuje největší mikrotrhlinu ve vzorku a klesá se zvyšující se pevností materiálu, přičemž přibližné meze jsou pro vysokopevné materiály od setin milimetru, do několika desetin milimetru pro materiály s nízkou pevností [12].

### 3.1.3 Šíření trhliny

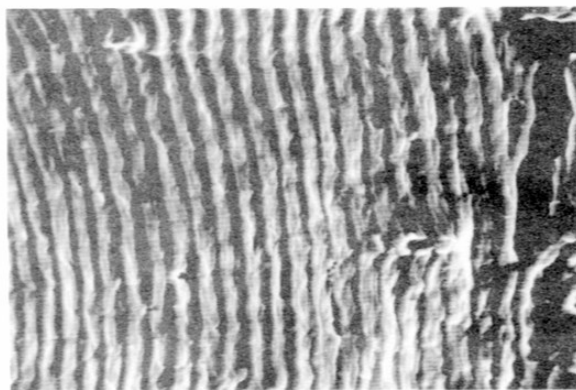
Stádium šíření trhliny lze rozdělit, vzhledem k mikromechanismu šíření, na dvě fáze (obr. 6). První nastává krystalografické šíření (I. fáze šíření) a poté následuje nekrytalografické šíření (II. fáze šíření) [13, 15].



Obrázek 6: Fáze šíření trhliny [15]

Krystalografické fázi odpovídají krátké trhlínky, šířící se dovnitř krystalu mechanismem střídavého dislokačního skluzu podél krystalografických skluzových rovin. Rychlost šíření trhlín v této fázi je velmi malá a je omezena strukturními překážkami, např. hranicemi dvojčat, hranicemi zrn. V této fázi se trhliny propojují a odklání se ke směru kolmému k největšímu hlavnímu napětí, ve kterém se již šíří dlouhá tzv. magistrální trhlina, jejíž šíření je charakterizováno druhou fází [13, 15].

Nekrystalografické šíření probíhá ve směru kolmém k největšímu hlavnímu napětí a jedná se o stále se opakující proces, kdy se předpokládá růst velikosti trhliny s každým dalším zatěžovacím cyklem. Důkazem opakování procesu šíření trhliny je vznik únavového žlábkování na lomové ploše, tzv. striace (obr. 7). Žlábkování je charakteristickým rysem únavového procesu. Vzdálenost mezi žlábkami odpovídá zjednodušeně přírůstku délky trhliny během jednoho cyklu. Toto, pro únavový proces typické žlábkování, nemusí být přítomno na celé lomové ploše, např. u austenitických ocelí žlábkování převládá, zatímco u vysokopevných martenzitických ocelí se oblasti se žlábkami vyskytují zřídka [12, 13, 15].



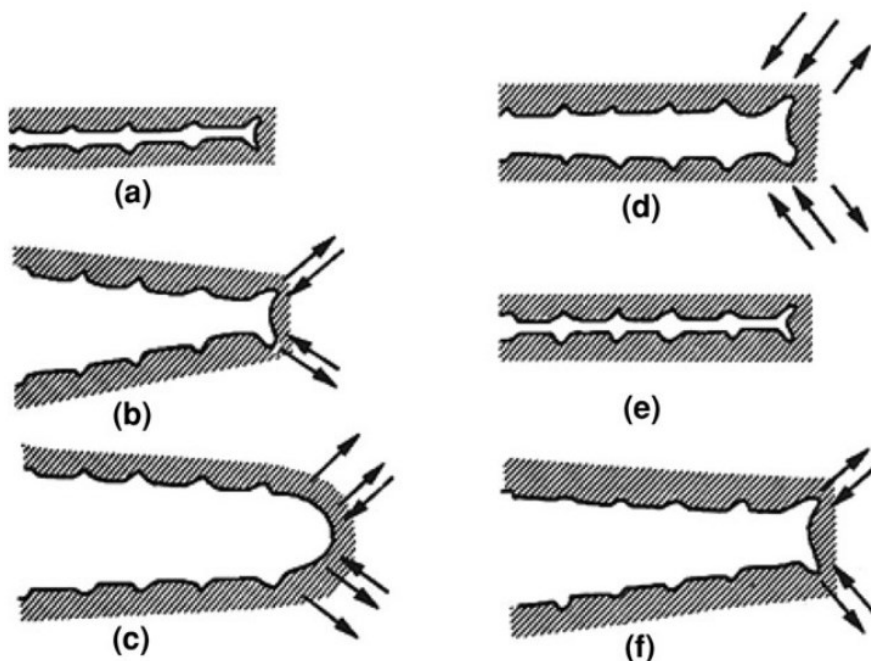
Obrázek 7: Striace [17]

Jako základní a převažující mechanismus šíření magistralní únavové trhliny, ne však jediný, lze považovat Lairdův model, zobrazený na obrázku 8. Výchozí stav trhliny odpovídá stavu bez zatížení (obr. 8a). Tahové zatížení trhliny způsobí na jejím čele intenzivní plastickou deformaci, která probíhá na rovinách s maximálním smykovým napětím (obr. 8b). Tyto roviny svírají s rovinou trhliny úhel  $45^\circ$ . V důsledku dalšího zvýšení napětí se skluzové zóny rozšíří, čímž se otupí čelo trhliny a trhlina se tak posune ve směru šíření (obr. 8c). Reverze napětí změní smysl deformace ve skluzových zónách, a tím se k sobě přiblíží obě poloviny trhliny (obr. 8d). Ve směru skluzových rovin zůstávají „uš“i, které na lomové ploše pozorujeme jako únavový žlábek. Po skončení zatěžovacího cyklu má trhlina původní tvar (obr. 8e), ale zvětšila se o  $\Delta l$ . Při cyklickém zatěžování se proces šíření neustále opakuje (obr. 8f) [12].

Pomocí lomové mechaniky můžeme popsat proces šíření trhliny v závislosti na zatěžování a materiálu, díky čemuž můžeme vypočítat např. zbytkovou životnost konstrukcí s trhlínami nebo velikost maximální trhliny v závislosti na zatěžování. Tento popis nám říká, že křivka rychlosti šíření trhlín, vyjadřující závislost rychlosti šíření na amplitudě intenzity napětí, závisí pouze na materiálu [12].

U některých typů ocelí může být šíření trhlín ovlivněno sníženou nebo zvýšenou teplotou, nebo také vlivem korozivního prostředí. Při běžných teplotách se trhliny v obou stádiích většinou šíří uvnitř zrna, transkrystalicky. Při zvýšených teplotách však nastává šíření trhlín podél hranic zrn. Zvýšení teploty také vede ke zvýšení rychlosti šíření únavových trhlín, což je způsobeno vyšším rozsahem střídavé plastické deformace na špičce trhliny. Korozivní prostředí také vede, ve většině případů, ke zvýšení rychlosti šíření trhlín a poklesu únavových hodnot. Jedná se zejména o prostředí, které obsahují vodík (např.:  $H_2$ ,  $H_2O$ ). Hlavním mechanismem vlivu korozivního prostředí na rychlost šíření únavových trhlín je tedy vodíkové zkrěhnutí [12, 13].



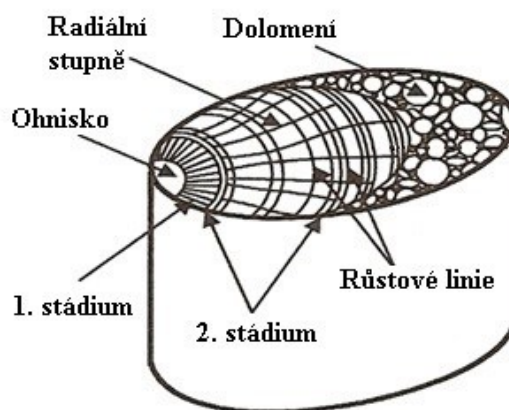


Obrázek 8: Lairdův model šíření únavové trhliny [18]

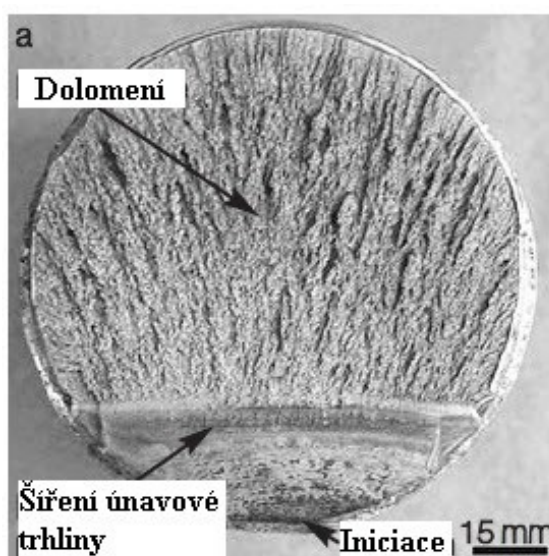
### 3.1.4 Závěrečný lom

Závěrečný lom materiálu je konečným stádiem únavového procesu. Dochází k němu v důsledku šíření trhliny, kdy po dosažení její kritické velikosti je nosný průřez součásti oslaben natolik, že dojde k náhlému lomu zbylého průřezu. Pro únavový lom je charakteristické, že k němu dochází náhle, bez předchozí makrodeformace materiálu. V technické praxi je cca 80% lomů únavového typu, což dělá z únavového lomu nejčastější mezní stav při provozním zatížení [13, 15].

Na lomové ploše únavového lomu lze rozlišit dvě oblasti (obr 9, 10). První rozlišitelná oblast je oblast únavového poškození, ve které lze při malém zvětšení pozorovat místo iniciace trhliny a oblast stabilního šíření trhliny. Okolo místa iniciace trhliny se vyskytují stupínky a lemy, což jsou nepravidelné útvary vznikající propojováním sousedních mikrotrhlin nebo přechodem čela trhliny na jinou rovinu šíření. V oblasti stabilního šíření trhliny jsou pozorovatelné striace. Druhá rozlišitelná oblast na lomové ploše je oblast dolomení, tzv. zbytkového lomu. Pro tuto oblast je charakteristický jiný tvar lomové plochy a jiný mechanismus porušení materiálu. Podle tvaru a poměru velikosti oblastí únavového poškození a dolomení lze zpětně posoudit podmínky namáhání, za kterých došlo k únavovému lomu, což může být přínosné při zjišťování příčin provozních lomů [13, 15].



Obrázek 9: Únavový lom [17]



Obrázek 10: Povrch únavového lomu při aplikovaném vysokém zatížení [19]

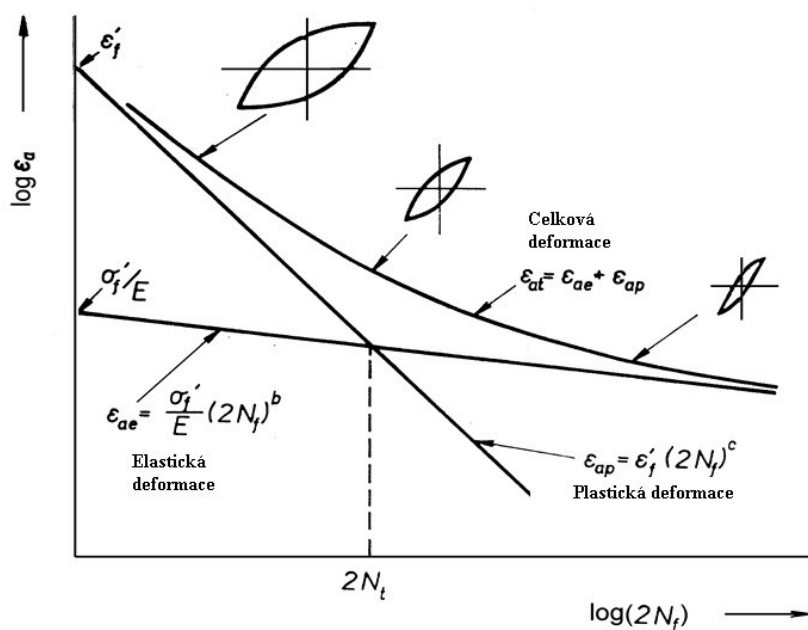
### 3.2 Nízkocyklová únava

Únavový proces s vysokou amplitudou střídavého napětí a deformace a malým počtem cyklů vedoucích k únavovému lomu se označuje jako nízkocyklová únava. Počet cyklů u nízkocyklové únavy bývá obvykle menší než  $10^5$ . Pro hodnocení životnosti v oblasti nízkocyklové únavy se často využívá Manson-Coffinův vztah:

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_f^* (2N_f)^c,$$

kde  $\varepsilon_{ap}$  je amplituda plastické deformace,  $\varepsilon_f^*$  je součinitel únavové tažnosti,  $N_f$  je počet cyklů do lomu a  $c$  je součinitel únavové životnosti. Grafické zobrazení této závislosti počtu cyklů do lomu na amplitudě plastické deformace je zobrazeno na obr. 11. Nízkocyklová únava se může

vyskytnout během provozního zatížení v mnohých zařízeních, např. v energetických systémech, potrubích, turbínách, dopravních zařízeních apod. [11, 12].



Obrázek 11: Manson-Coffinova křivka [20]

### 3.2.1 Inicie a šíření trhliny u nízkocyklové únavy

U nízkocyklové únavy obvykle probíhá proces iniciace a šíření ve dvou fázích. V první fázi mají na iniciaci trhlín značný vliv hranice zrn, podél nichž se v důsledku vysokých amplitud plastické deformace vytváří mikrotrhliny. Trhliny se šíří obvykle pod úhlem blízkým  $45^\circ$  k hlavnímu napětí a mohou se i navzájem spojovat. V technických materiálech jsou většinou iniciačními místy inkluze, póry, tvrdé částice jiné fáze apod. Ve druhé fázi šíření dosáhne trhlina určité velikosti a stáčí se do směru kolmého k hlavnímu napětí. V této fázi lze šíření trhliny popsat pomocí Lairdova modelu [12].

V oblasti nízkocyklové únavy se trhliny iniciují už na začátku únavové životnosti, a proto stádium iniciace tvoří pouze malou část únavové životnosti materiálu. Zbylá část únavové životnosti tedy připadá na stádium šíření únavové trhliny [12].

### 3.2.2 Životnost hladkých a vrubovaných těles

Nízkocyklová odolnost se většinou posuzuje na hladkých tělesech kruhového průřezu, které jsou zatěžovány konstantní rychlostí a amplitudou deformace. Během zatěžování se zaznamenávají hysterezní smyčky po vybraném počtu cyklů. Při mezním stavu lze na

hysterezní smyčce pozorovat charakteristickou změnu tvaru, kdy se v tlakové části cyklu smyčka zaškrcuje [12].

Pro tělesa s vruby je typické nerovnoměrné rozdělení napětí a deformace v tělese při zatížení. Napětí jsou koncentrována v oblasti vrcholu vrubu, který se tak stává místem iniciace únavové trhliny. V porovnání s hladkými tělesy mají vrubovaná tělesa sníženou životnost. Únavovou životnost vrubovaných těles lze předpovědět pomocí koncepce lokálního napětí a deformace, avšak ne vždy se bude rovnat vypočítaný počet cyklů skutečnému počtu cyklů do lomu [12].

### ***3.2.3 Vliv provozních faktorů na nízkocyklovou únavu***

Mezi provozní faktory ovlivňující nízkocyklovou únavu patří především teplota, rychlost zatěžování a korozivní prostředí. Z těchto faktorů se únavová životnost nejvýrazněji mění s teplotou [12].

Při zvýšených teplotách je životnost kovových materiálů ovlivněna daleko více než při snížených teplotách. Únavová životnost je výrazně ovlivněna rychlostí zatěžování, časovým průběhem cyklu, a také okolním prostředím. Mechanismus iniciace a šíření trhlin je při zvýšených teplotách ovlivňován především charakterem skluzu a rychlostí deformace. K iniciaci únavové trhliny přispívá také creepová složka deformace [12].

### **3.3 Vysokocyklová únava**

Vysokocyklová únava je charakterizována napětími nižšími, než je mez kluzu  $R_e$  a počtem zatěžovacích cyklů obvykle od  $10^5$  do  $10^7$ . Jedná se tedy o velmi vysoký počet zatěžovacích cyklů při malých amplitudách zatížení, a skoro neměřitelných amplitudách plastické deformace. Jako přechod mezi oblastí nízkocyklového a vysokocyklového namáhání lze považovat bod, kdy nad plastickou složkou deformace začíná převládat elastická složka. Na Wöhlerově křivce (obr. 12), která charakterizuje závislost počtu cyklů na působícím napětí, odpovídá vysokocyklové únavě oblast C-D. Vysokocyklová únava je typická např. pro provozní zatížení dopravních zařízení [13, 17, 20].



Obrázek 12: Wöhlerova křivka [13]

### 3.4 Provozní únavová životnost

Většina zařízení není během svého provozu zatěžována harmonicky, a proto nelze přesně určit průběh zatěžování zkoušeného tělesa. Z tohoto důvodu se obvykle během provozu zařízení měří jeho provozní zatížení, a poté se experimentálně stanoví a sestaví model co nejvíce věrohodný provozním podmínkám. Měření by se měla provádět v podmínkách typických pro provoz zařízení. K měření provozních zatížení se obvykle používají různé snímače, např. odporové tenzometry, které se umísťují do míst, kde chceme zjistit velikost namáhání. Snímače se tedy pro měření největší deformace umísťují ve směru největšího hlavního napětí. Po získání údajů provozního zatížení zařízení se data zpracují pro určení odhadu životnosti nebo laboratorního modelování při experimentálním ověřování životnosti [12].

### 3.5 Korozní únava železničních náprav

Nápravy železničních dvojkolí patří mezi vysoce namáhané součásti, které jsou během svého provozu namáhány zejména ohybem za rotace. Lomy náprav vznikají při nízkých zatíženích pod mezí únavy materiálu po velkém počtu cyklů v blízkosti konce nalisovaného náboje kola. Trhliny, vedoucí k lomu, jsou iniciovány zejména v místech korozních důlků. Trhliny proto vznikají v oblastech největšího korozního napadení, kde je největší počet korozních důlků. Jejich vzdálenost bývá v řádech milimetrů (1-2), a proto se jednotlivé trhliny mohou snadno spojovat. Spojováním mikrotrhlin s hlavní trhlinou, na povrchu nápravy, vzniká typický „zig-zag“ tvar trhlin [21, 22].



Korozní napadení náprav je označováno jako vibrační koroze, jelikož se jedná o proces urychlený mechanickou oscilací, kdy je oxidační vrstva  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  opakovaně vytvářena a odstraňována. Růst trhlinek začíná z iniciačních center, trhliny se následně spojují a rostou jak po obvodu nápravy, tak do hloubky. Po dosažení cca 2 mm hloubky, a porušení po celém obvodu, začne převažovat vrubový účinek trhliny, a ta se šíří ke středu nápravy. Šíření neprobíhá symetricky, obvykle bývá trhlina posunuta na jednu stranu. Nakonec dojde k náhlému lomu zbývajících částí nápravy [21].

### ***3.5.1 Vznik trhlín z korozních důlků***

Vznik korozních důlků a trhlín z nich nastává už v raném stádiu korozně-únavového poškození, přibližně už při 5 % průměrné životnosti. Jako nejčastější místa vzniku korozních důlků jsou obvykle hranice dvou feritických zrn nebo zrno s feritickou matricí. Korozní důlky vzniklé v těchto místech dosáhnou po určitém čase polokulovitěho tvaru. Vznik trhlín z korozních důlků se dá rozdělit do 3 stádií. V prvním stádiu, po dosažení hloubky důlku cca 15-20  $\mu\text{m}$ , se na dně primárního důlku polokulovitěho tvaru začne iniciovat sekundární důlek, v němž se koncentruje napětí. Ve druhém stádiu začne mikrotrhlina vznikat na dně primárního důlku a následně se z něj šíří, což je třetí stádium [4].

Průměr důlku je pro všechna tři stadia přechodu z důlku v trhlinu přibližně stejný, stejně jako se výrazně nemění velikost důlku s úrovní napětí [4].

## **4 METODY HODNOCENÍ ÚNAVOVÉHO POŠKOZENÍ NÁPRAV**

Železniční nápravy bývají, mimo provozní zatížení, vystaveny také různým vlivům prostředí, jako je např. dešťová voda. Vystavení náprav vlivům dešťové vody, za současného zatížení ohybem za rotace, vede k výraznému snížení únavové pevnosti materiálu. Z tohoto důvodu jsou prováděny testy, pro zjištění korozně-únavových vlastností ocelí používaných pro výrobu náprav [22].

### **4.1 Testování korozně-únavových vlastností oceli A1N**

Testování korozně-únavových vlastností probíhá pod vlivem střídavého zatížení aplikovaného na vzorek ohybem za rotace. Vzorky pro testování mají tvar přesýpacích hodin s minimálním průměrem 10 mm, povrch vzorků bývá leštěný. Testovací zařízení obvykle pracuje při frekvenci 6-8 Hz, což odpovídá provozu nápravy při rychlosti 60-80 km/h [22].

Testy simulující vystavení nápravy dešťové vodě se skládají z „mokrých“ a „suchých“ cyklů. Mokrý část cyklu, trvá 1 hodinu, během ní je na vzorek, za současného zatížení, kapána umělá dešťová voda. Během suché části cyklu, trvající 2 hodiny, je zkušební vzorek vystaven pouze zatížení zkušebního zařízení. Kromě toho jsou na vzorek každých 864 000 cyklů, po dobu 10 minut, aplikovány koncentrované chloridové anionty, reprezentující vystavení nápravy chloridům [22].

Pro testování šíření únavových trhlin v korozivním prostředí se vzorky oceli A1N vystavují stejným zatížením jako u mokro-suchého testování. V minimálním průměru bývají naproti sobě vyřezány dvě mikrodíry o průměru 50-60  $\mu\text{m}$  a hloubce 300  $\mu\text{m}$ , což odpovídá velikosti korozního důlku. Takto upravené vzorky jsou během testování podrobeny různým úrovním napětí, např. 240, 320 a 400 MPa. Kontrola povrchu vzorku nastává po zvoleném počtu zatěžovacích cyklů. Po přerušení testování je ze vzorku odstraněna rez, vytvořena plastická replika a zkoumáno šíření trhlin na povrchu [22].

Testování korozně-únavových vlastností prokazují, že při úrovni napětí menší než je mez únavy a počtu zatěžovacích cyklů vyšším než  $10^6$  vznikají v korozivním prostředí, na povrchu vzorku, trhliny větší než při běžném zatížení. Únava železničních náprav je tedy silně ovlivněna přítomností mírně korozivního prostředí, jako je dešťová voda [22].

## **4.2 Vybavení pro optickou kontrolu náprav**

Nedestruktivní kontrola náprav umožňuje stanovení množství mikrotrhlin, anebo stádium poškození nápravy pomocí hodnocení povrchu mikroskopem. Aparatura se skládá z mikroskopu, jeho držáku a snímače. Držák umožňuje nastavit mikroskop kolmo k nápravě, což je nezbytné k pozorování jejího povrchu. Pomocí snímače lze s mikroskopem rotovat kolem nápravy, aby bylo možno kontrolovat celý její povrch. Pomocí mikroskopu jsou pořízeny obrázky, které jsou zaznamenávány a zpracovány pomocí softwaru, který dovoluje stanovit velikost a množství trhlin ve vyšetřované oblasti. Software používaný pro kontrolu náprav dokáže rozpoznat a identifikovat trhliny a důlky pomocí jejich morfologických vlastností [4].

## **4.3 Řádkovací elektronová mikroskopie**

Při testování životnosti železničních náprav jsou povrchy vzorků/náprav zaznamenávány pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu (SEM – Scanning Electron Microscope). Obrázky jsou poté porovnávány k určení stádia životnosti nápravy, velikosti a tvaru trhlin na povrchu, atd. [4, 22].

Řádkovací elektronový mikroskop je zařízení, které pracuje na základě urychleného svazku elektronů. Tento úzký svazek elektronů je pomocí elektromagnetických čoček zaostřován na povrch vzorku. Při interakci svazku elektronů se vzorkem vznikají detekovatelné signály, které jsou následně zaznamenávány detektorem. Takto se řádek po řádku nasnímá povrch vzorku při určitém zvětšení. Z nasnímaných signálů se poskládá výsledný obraz [23].

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro praktickou část byly vybrány vzorky z 5 železničních náprav jakosti EA1N. Jednotlivé vzorky náprav byly označeny pořadovými čísly 28, 177, 227, 303 a 698. Cílem experimentální části bylo zjistit iniciační místa únavových trhlin, respektive korozní důlky, jejichž přítomnost vedla k předčasné iniciaci únavové trhliny.

### 5.1 Vlastnosti zkorodovaných náprav

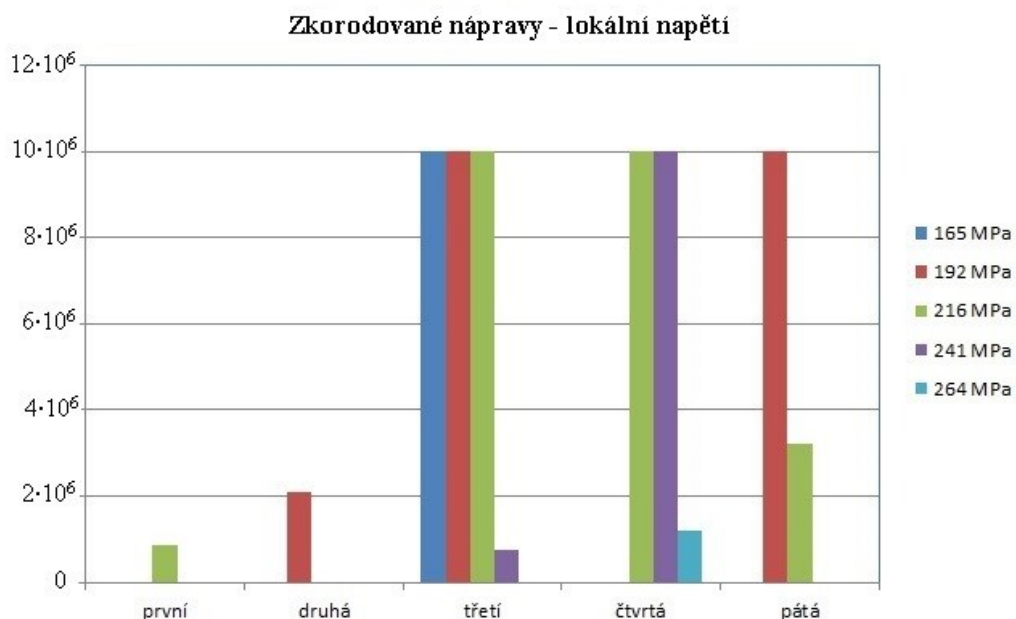
Nápravy, z nichž byly odebrány vzorky pro nalezení korozních důlků, jsou zobrazeny na obrázku 13. Tyto nápravy nebyly nijak ošetřeny proti korozi, tzn., že nápravy nebyly natřeny ochranným nátěrem, ani žádným způsobem konzervovány.



Obrázek 13: Nápravy, na nichž byla zjišťována mez únavy

#### 5.1.1 Výsledky únavových zkoušek

Nápravy byly podrobeny únavovým zkouškám, při nichž byly na nápravy aplikovány určité hladiny lokálního napětí. Velikosti lokálních napětí aplikovaných na zkorodované nápravy jsou graficky znázorněny ve sloupcovém grafu (obr. 14). Osa Y znázorňuje počet cyklů do lomu v milionech cyklů. Při porovnání s hodnotami uvedenými v normě ČSN EN 13261 byla mez únavy dosažena pouze u čtvrté nápravy.



Obrázek 14: Grafické znázornění výsledků únavových zkoušek zkoumaných náprav

### 5.1.2 Tahová zkouška náprav

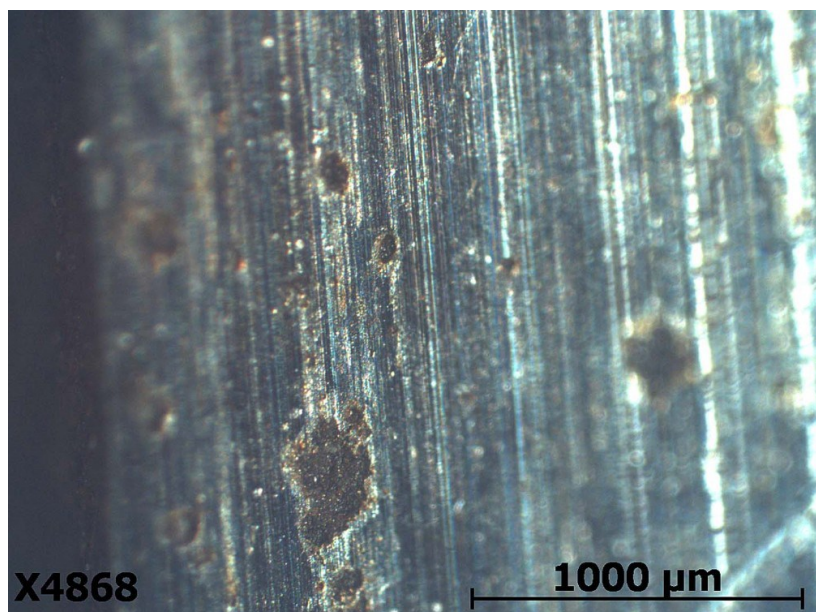
Testované nápravy byly podrobeny také tahové zkoušce. Výsledky zkoušky, uvedené v tabulce 5, vyhovují pro všech pět náprav požadavkům normy.

Tabulka 5: Výsledky tahové zkoušky

Zkouška tahem dle ČSN EN ISO 6892-1					Použité zkušební zařízení: trhací stroj INSTRON 5985, v.č.5985L2123					
Identifikace zkušebního vzorku		Teplota prostředí: 23°C								
Číslo tavby	Pořadové číslo	Průměr	Průřez	Počáteční měřená	Konečná měřená	Smluvní mez	Pevnost	Tažnost	Tažnost z průtahoměru	Kontrakce
			S <sub>0</sub>	délka L <sub>0</sub>	délka L <sub>u</sub>	kluzu	v tahu	A	At	Z
	- umístění	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	R <sub>p0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[%]
74600	28	10,01	78,7	50	-	360	610	-	29,17	55,60
	177	10,03	79,0	50	-	352	561	-	30,00	54,17
	227	10,00	78,5	50	-	353	570	-	29,76	55,78
	303	10,01	78,7	50	-	383	629	-	27,89	54,53
	698	10,02	78,9	50	-	358	586	-	29,59	57,92

### 5.1.3 Metalografické pozorování povrchů

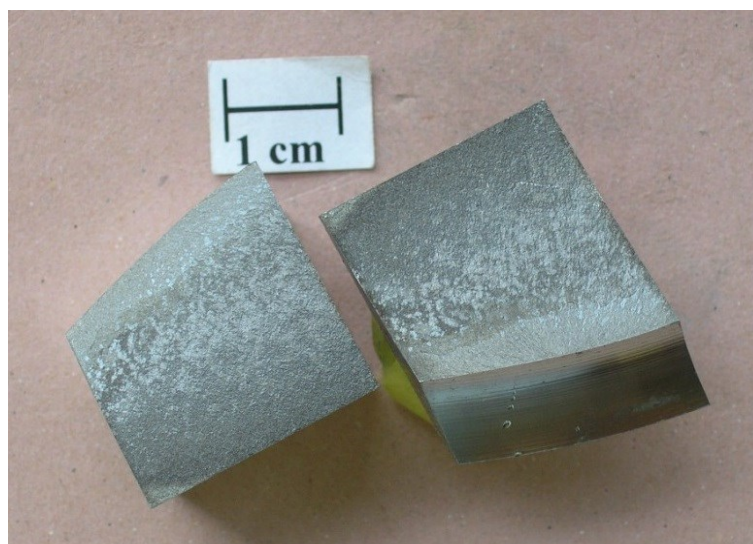
Během metalografického pozorování byla na povrchu dříku náprav v místě iniciace trhliny nalezena iniciační místa ve formě korozních důlků. Tato iniciační místa jsou zobrazena na obrázku 15.



Obrázek 15: Korozní napadení dříku nápravy

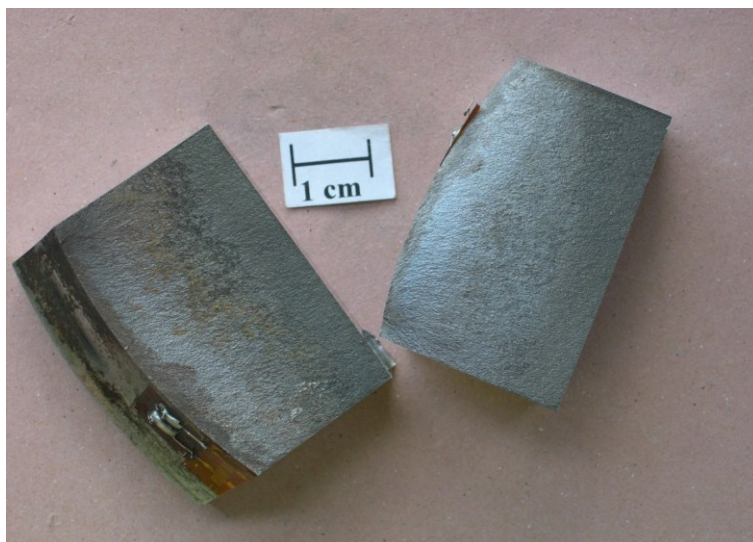
## 5.2 Vzorky s iniciačními místy

Z výše uvedených náprav byly odebrány vzorky pro stanovení iniciačních míst únavové trhliny. Každý vzorek nápravy byl tvořen dvojicí protilehlých částí lomové plochy. Na obrázcích č. 16-18 jsou zobrazeny vzorky č. 28, 177 a 303, na nichž lze pozorovat linie vedoucí k iniciačnímu místu trhliny. Vzorky byly čištěny zředěným roztokem kyseliny fosforečné.

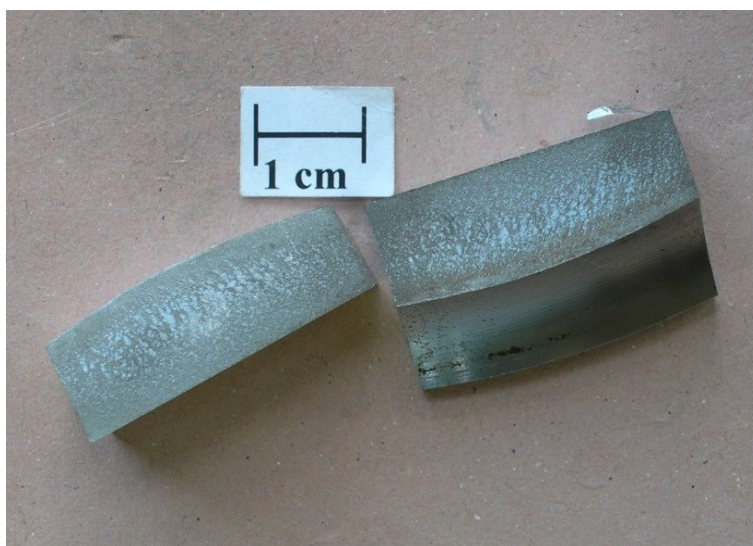


Obrázek 16: Vzorek č. 28





Obrázek 17: Vzorek č. 177



Obrázek 18: Vzorek č. 303

### 5.3 Iniciační místa – korozní důlky

Zjišťování korozních důlku v oblasti místa iniciace trhliny bylo prováděno pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu JEOL JSM 6490LV. Lomové plochy pozorovaných vzorků byly orientovány kolmo k optické ose mikroskopu.

Korozní důlky byly nalezeny u všech pěti zkoumaných vzorků. U vzorku č. 303 byl výskyt korozních důlků nejmenší a zároveň byly pozorované důlky pouze mělké. Většinou byly nalezeny shluky korozních důlků. Jednotlivé korozní důlky měly zpravidla atypický tvar, kdy převládal lineární rozměr ve směru povrchu vzorku. Korozní důlky nalezené na vzorcích

se z fraktografického hlediska shodují s korozními důlky publikovanými v literatuře [4, 24, 25].

Rozměry nalezených korozních důlků na jednotlivých vzorcích, v místě iniciace únavové trhliny, jsou uvedeny v tabulce 6. Velikosti korozních důlků jsou charakterizovány rozměrem v rovině povrchu a rozměrem ve směru kolmém k povrchu, tzn. „průměrem“ a hloubkou. Rozměry korozních důlků, uvedené v tabulce 6, mají rozsah od minimální do maximální hodnoty. Největší pozorovaný důlek byl nalezen na vzorku č. 698. Jeho rozměry byly přibližně 610  $\mu\text{m}$  v „průměru“ a 150  $\mu\text{m}$  do hloubky.

Tabulka 6: Rozměry korozních důlků v místě iniciace

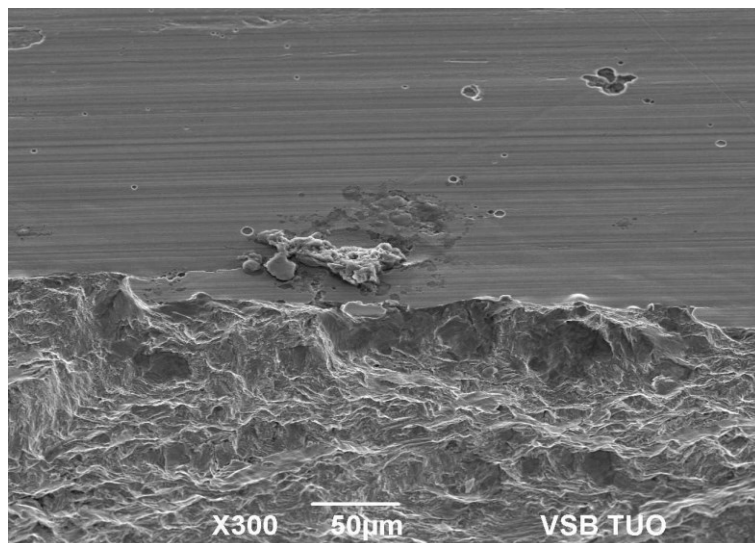
<b>Číslo vzorku</b>	<b>„Průměr“ korozního důlku (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Hloubka korozního důlku (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>28</b>	80-216	36-43
<b>177</b>	80-267	27-64
<b>227</b>	52-176	23-102
<b>303</b>	102-130	24-34
<b>698</b>	40-610	65-150

Uvedené rozměry korozních důlků je třeba považovat za orientační, vzhledem k obtížnému stanovení hranic jednotlivých důlků. Na obrázcích č. 25 a 26 jsou zobrazeny příklady stanovení velikosti korozních důlků.

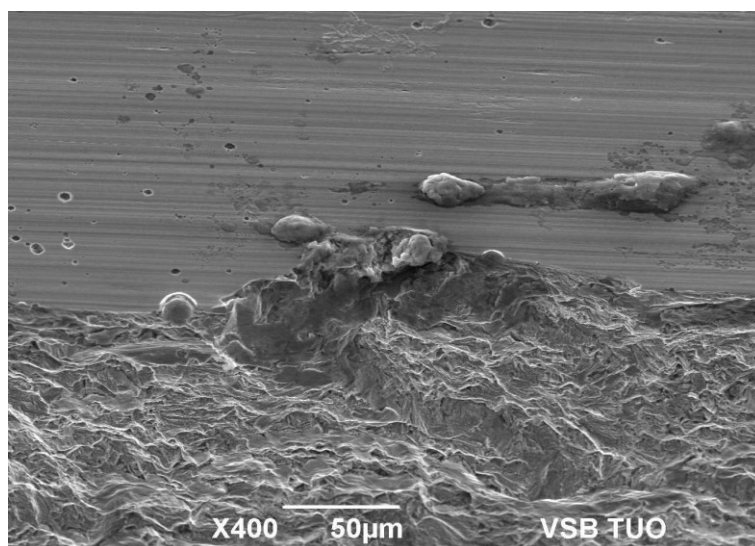


### 5.3.1 Vzorek č. 28

Na obrázcích č. 19 a 20 jsou zobrazeny korozní důlky pozorované na vzorku č. 28.



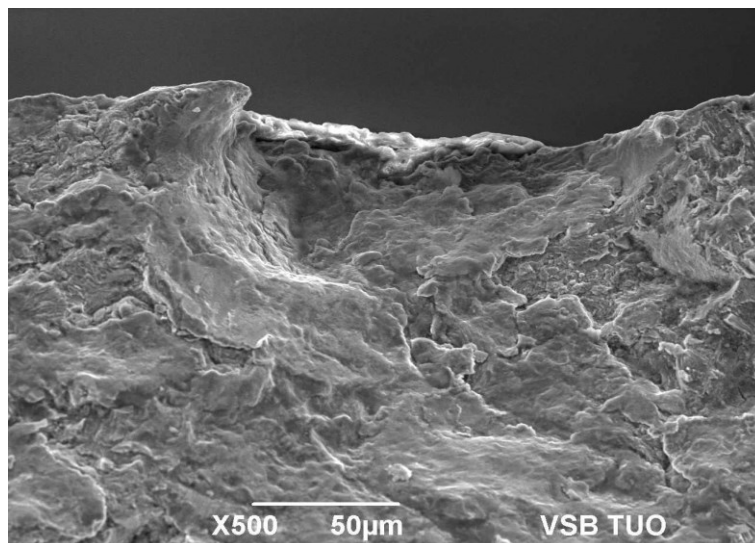
Obrázek 19: Korozní důlek



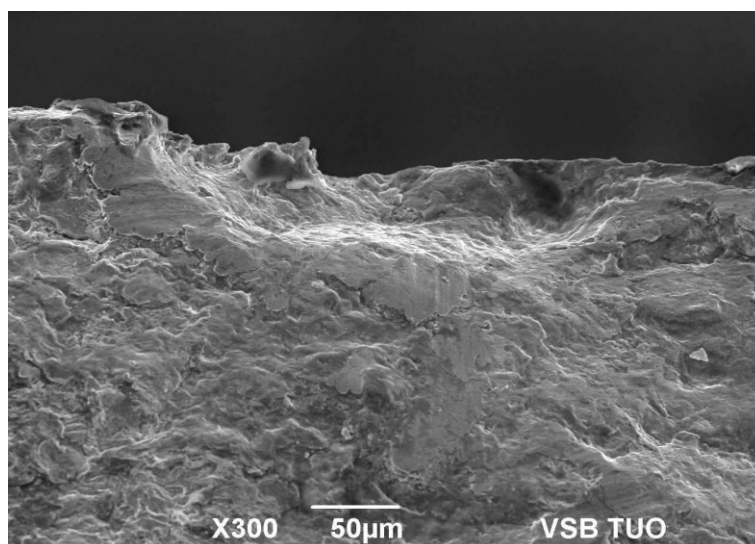
Obrázek 20: Korozní důlek

### 5.3.2 Vzorek č. 177

Na obrázcích č. 21 a 22 jsou zobrazeny korozní důlky pozorované na vzorku č. 177.



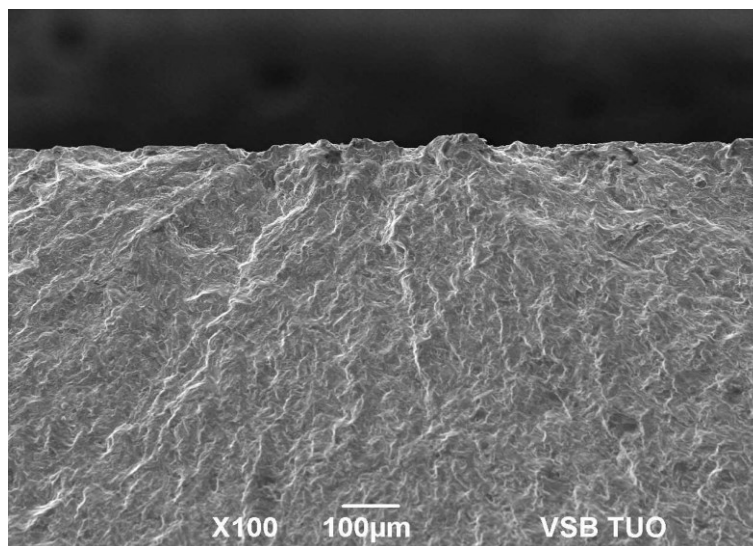
Obrázek 21: Korozní důlek



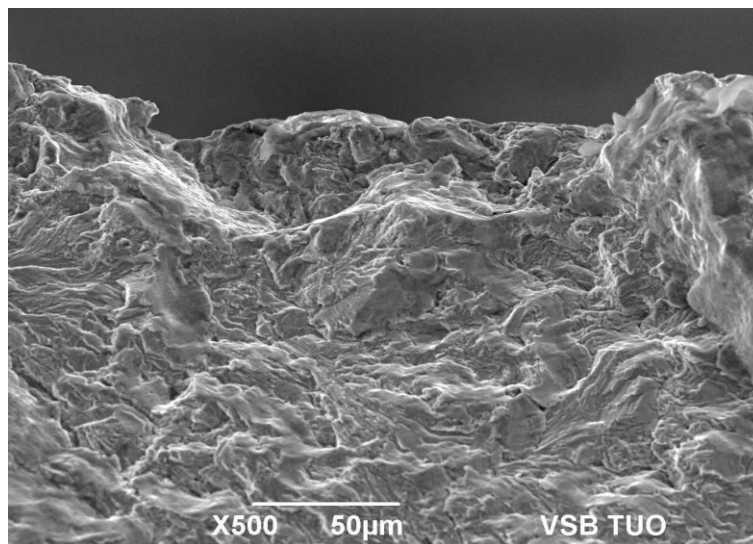
Obrázek 22: Korozní důlek

### 5.3.3 Vzorek č. 227

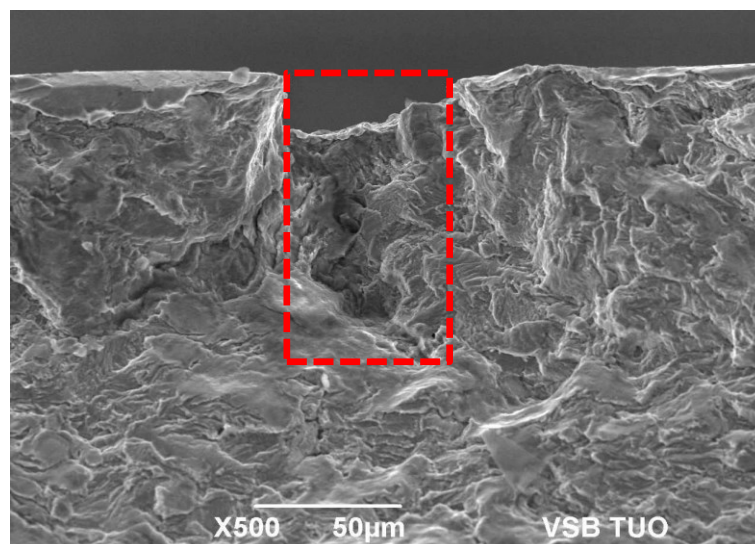
Na obrázku č. 23 je zobrazena lomová plocha, na které lze pozorovat linie sbíhající se k iniciačním místům trhliny – korozním důlkům. Na obrázcích č. 24 a 25 jsou zobrazeny korozní důlky pozorované na vzorku č. 227. Na obrázku č. 25 je navíc vyznačená přibližná velikost korozního důlku.



Obrázek 23: Lomová plocha



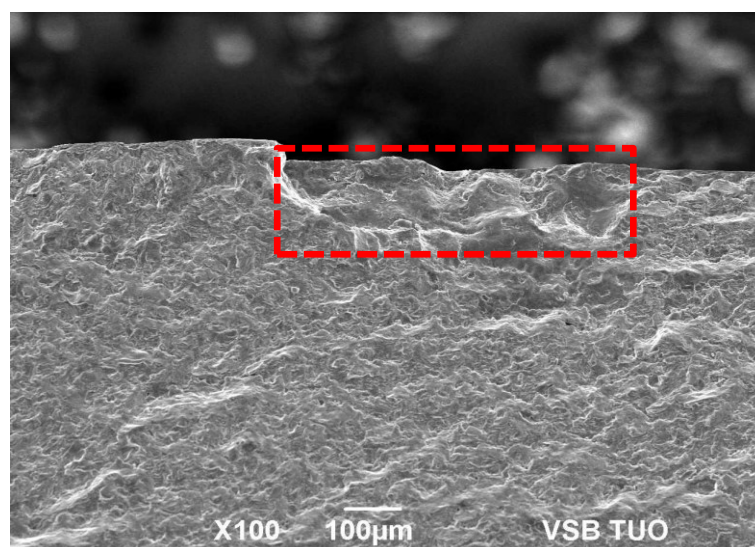
Obrázek 24: Korozní důlek



Obrázek 25: Stanovení velikosti korozního důlku

#### 5.3.4 Vzorek č. 698

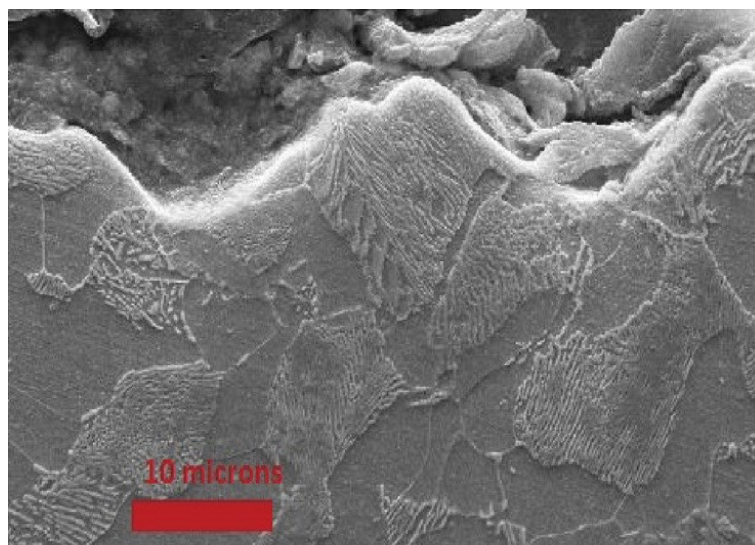
Na obrázku č. 26 je zobrazeno stanovení velikosti korozního důlku přítomného na vzorku č. 698.



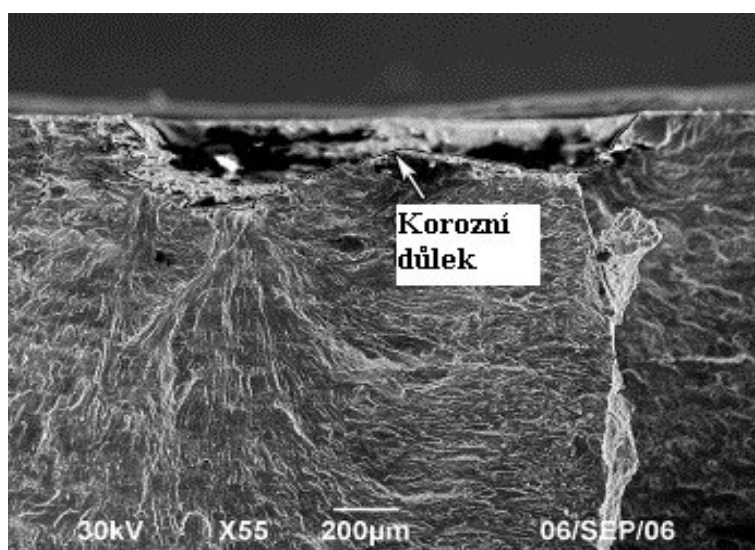
Obrázek 26: Stanovení velikosti korozního důlku

### 5.3.5 Korozní důlky v odborné literatuře

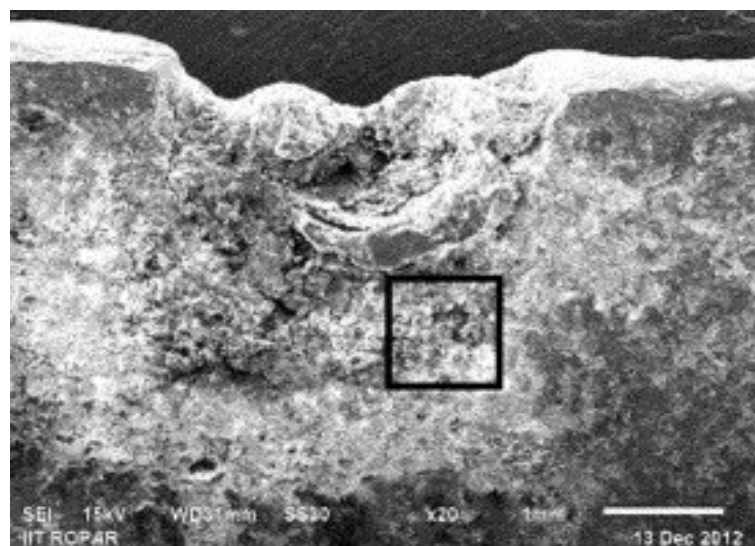
Na obrázcích č. 27-29 jsou zobrazeny korozní důlky z prací [4, 24, 25] podobné korozním důlkům, které byly nalezeny na testovaných vzorcích.



Obrázek 27: Korozní důlky obsažené v perlitickém zrně [4]



Obrázek 28: Zobrazení korozního důlku z práce [24]



Obrázek 29: Fraktografické zobrazení korozního důlku v SEM [25]

## 6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byla problematika únavového poškození ocelí používaných pro výrobu železničních náprav. V úvodu této práce byly charakterizovány vlastnosti, používaná tepelná zpracování a vliv prvků přítomných v nejběžněji používaných ocelích pro výrobu železničních náprav. Dále bylo v práci popsáno únavové poškození ocelí, zejména pak jednotlivá stadia únavového poškození oceli a s tím související únavová životnost.

Experimentální část byla zaměřena na nalezení možných korozních důlků v místech iniciace předčasné únavové trhliny na povrchu vzorků zkorodovaných železničních náprav. Místa iniciace trhlín byla studována pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu JEOL JSM 6490LV. Ve studovaných oblastech byly nalezeny korozní důlky, respektive nahromadění korozních důlků. Nalezené korozní důlky s největší pravděpodobností vedly k předčasnému únavovému poškození náprav. Důsledkem tohoto předčasného únavového poškození, způsobeného korozními důlky, je nevyhovující únavová životnost 4 z 5 zkoušených náprav při testování odolnosti vůči únavovému poškození.



## POUŽITÁ LITERATURA:

- [1] ČSN EN 13261. *Železniční aplikace – Dvojkolí a podvozky – Nápravy – Požadavky na výrobek*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [2] UIC: *International union of railways*. [online]. UIC: © 2015 [cit. 9. 2. 2015]. Dostupné z: <http://www.uic.org/cdrom/2006/wcrr2006/pdf/617.pdf>
- [3] UIC 811-1. *Technické podmienky pre dodávku osí náprav pre železničné vozidlá trakčné a pre železničné vozidlá v prívесе*. 4. vyd. 1987.
- [4] BERETTA, Stefano, LO CONTE, Antonietta, RUDLIN, John a PANGGABEAN, Dorothee. *From atmospheric corrosive attack to crack propagation for AIN railway axles steel under fatigue: Damage proces and detection. Engineering Failure Analysis*. [online]. Elsevier. 2015, vol. 47, s. 252-264 [cit. 10. 2. 2015]. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: doi:10.1016/j.engfailanal.2014.07.026.
- [5] Bolzano.cz. [online]. Bolzano: © 2015 [cit. 10. 2. 2015] Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli-c35>
- [6] Bolzano.cz. [online]. Bolzano: © 2015 [cit. 10. 2. 2015] Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli-25crmo4>
- [7] VÁŇOVÁ, Petra. *Základy tepelného zpracování* [online]. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011 [11. 2. 2015]. Dostupné z: [http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/636-Vanova\\_ZTZ.pdf](http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/636-Vanova_ZTZ.pdf)
- [8] KONTOROVÍČ, I. E. *Tepelné zpracování oceli a litiny*. Tepelné a chemicko-tepelné zpracování oceli. Litiny. Kniha I. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952. 264 s.
- [9] LUKEŠOVÁ, Kateřina. *Souvislost mezi strukturou a odolností vůči únavovému poškození u oceli pro nápravy železničních kol*. Ostrava, 2014. Bakalářská práce. Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [10] ŠEJNOHA, Roman. *Nauka o materiálu II*. Kovové materiály a jejich tepelné zpracování. Ostrava: Ediční středisko VŠB v Ostravě, 1968. 332 s.



- [11] STRNADEL, Bohumír. *Nauka o materiálu II. Degradáční procesy a design konstrukčních materiálů*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. 280 s. ISBN 978-80-248-1842-9.
- [12] KLESNIL, Mirko a kol. *Cyklická deformácia a únava kovov*. Bratislava: vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1987. 384 s.
- [13] Žilinská univerzita. *Katedra materiálového inžinierstva* [online]. Žilina: Katedra materiálového inžinierstva, © 2015. [19. 3. 2015]. Dostupné z: [http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/12/unava\\_materialu.doc](http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/12/unava_materialu.doc)
- [14] České vysoké učení technické v Praze. *Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí*. [online]. České vysoké učení technické v Praze: ©2012-2015. [3. 3. 2015]. Dostupné z: [http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources\\_old/pzk/obsah.html](http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources_old/pzk/obsah.html)
- [15] VODÁREK, Vlastimil. *Struktura a vlastnosti pevných látek* [online]. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008 [19. 3. 2015]. Dostupné z: <http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/636-Vodarek-Struktura-a-vlastnosti-pevných-látek.pdf>
- [16] NDT Resource Center. *Fatigue Crack Initiation* [online]. NDT: 2001-2014 [cit. 7. 3. 2015]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/fatigue.htm>
- [17] Žilinská univerzita. *Katedra materiálového inžinierstva* [online]. Žilina: Katedra materiálového inžinierstva, © 2015. [19. 3. 2015]. Dostupné z: <http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/12/%C3%A1nava-materi%C3%A1lu-HavrilaBozik.ppt>
- [18] MILELLA, P.P., *Fatigue and Corrosion in Metals* [online]. Springer, 2013 [13. 3. 2015]. ISBN 978-88-470-2335-2. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/SpringerIndia/fatigue-and-corrosion-in-metals>
- [19] Total Materia. *Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM): Part Two* [online]. Key to Metals AG, 2010. [19. 3. 2015]. Dostupné z: <http://keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=CZ&NM=299>
- [20] Univerzita Karlova v Praze. *Katedra fyziky materiálů MFF UK* [online]. Praha: KFM MFF UK, © 2009. [19. 3. 2015]. Dostupné z: [http://material.karlov.mff.cuni.cz/people/janecek/studenti/Fyzika\\_materialu2/Unava\\_new2008.ppt](http://material.karlov.mff.cuni.cz/people/janecek/studenti/Fyzika_materialu2/Unava_new2008.ppt)

- [21] MAŠÍN, Alois. *Poruchovost ocelových částí v železničním provozu*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1982. 296 s.
- [22] BERETTA, Stefano, CARBONI, Michele, FIORE, Giorgio a LO CONTE, Antonietta. Corrosion–fatigue of A1N railway axle steel exposed to rainwater. *International Journal of Fatigue* [online]. 2010, vol. 32, issue 6, s. 952-961 [cit. 20. 3. 2015]. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: doi: 10.1016/j.ijfatigue.2009.08.003.
- [23] VODÁREK, Vlastimil. *Metody studia struktury* [online]. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012 [23. 3. 2015]. ISBN 978-80-248-2559-5. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/MSS/Metody%20studia%20struktury.pdf>
- [24] CRAWFORD, Bruce R., LOADER, Chris, LIU, Qianchu, HARRISON, J. Timothy a SHARP, P. Khan. Can pitting corrosion change the location of fatigue failures in aircraft?. *International Journal of Fatigue* [online]. 2014, vol. 61, s. 304-314 [cit. 2015-04-28]. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.10.017.
- [25] BHAGI, Loveleen Kumar, GUPTA, Pardeep a RASTOGI, Vikas. Fractographic investigations of the failure of L-1 low pressure steam turbine blade. *Case Studies in Engineering Failure Analysis* [online]. 2013, vol. 1, issue 2, s. 72-78 [cit. 2015-04-28]. DOI: 10.1016/j.csefa.2013.04.007.